

OPPONENSI VÉLEMÉNY

Dr. Koltai Tamás
a műszaki tudomány kandidátusa

*Sensitivity Analysis at Production Planning and
Production Scheduling Models*

c. MTA doktori értekezéséről

1. ÁLTALÁNOS MEGJEGYZÉSEK, A TÉMAVÁLASZTÁS ÉRTÉKELÉSE.

Az angol nyelvű disszertáció 114 számozott oldalból áll, tartalmaz bevezetést, 5 érdemi fejezetet, a disszertáció eredményeinek rövid összefoglalását, 52 tételből álló saját publikációs jegyzéket, valamint a disszertációban felhasznált 161 tételből álló irodalom bibliográfiai adatait. A felsorolt 52 saját publikáció közül 46-ban Jelölt elsőhelyes, vagy egyedüli szerző.

Az értekezés szép kivitelű, jól struktúrált, az ábrák, diagramok és táblázatok jól megrajzoltak, jelentős segítséget nyújtanak a sokirányú összetevőből álló anyag követéséhez. Az értekezés formai szempontból teljes mértékben megfelel az általános követelményeknek.

Jelölt műve a témakör egy aktuális és mind elméleti, mind gyakorlati szempontból jelentős területét tárgyalja. A termelésstervezés és termelésütemezés területén használt matematikai/operációkutatási modellek egyik fontos jellemzője, hogy ha bizonyos paraméterek, változók, feltételek, módosulnak, akkor ennek következtében hogyan módosul az optimális megoldás. A célfüggvénynek a változók/paraméterek szerinti gradiense az optimalizáló algoritmusok fejlesztéséhez, a vizsgált probléma általános összefüggéseinek megértéséhez, az optimális megoldás stabilitásának vizsgálatához nyújthat információt. Ezek a problémák (vagyis egy modell vizsgált jellemzőinek a modellparaméterekben való stabilitásának kvantitatív tulajdonságai) általában is a matematikai modellezés egyik alapvető feladata, amely különösen fontos a numerikus analízis, valamint a sztochasztikus szimuláció alkalmazhatósága szempontjából.

Az értekezés Jelöltnek a kandidátusi fokozat elnyerése után végzett és részletesen publikált kutatásait foglalta egységes szerkezetbe, úgy hogy a bemutatott kutatási problémákat és eredményeket az érzékenységvizsgálat kapcsolja össze. A kiválasztott és az értekezés fejezeteiben vizsgált problémák az operációkutatás területén ismertek, és fontosak. A vizsgált modellek (lineáris programozás, gyártósor kiegyenlítés, diszkrét szimuláció, ütemezés) alkalmazása a termelésstervezés és termelésütemezési területén egyrészt új elméleti eredményekhez, másrészt konkrét gyakorlati problémák megoldásához is vezetnek. Az értekezés alapját adó kutatási problémák a műszaki területen túlmutatva az operációkutatás területén is érdekes kutatási kérdéseket vetnek fel.

2. AZ DISSZERTÁCIÓ TARTALMI ÁTTEKINTÉSE

Az első fejezet (a Bevezetés) az értekezés témakörének meghatározásával, a kutatások aktualitásával és a vizsgált kutatási problémák körülhatárolásával foglalkozik, a 7. fejezet pedig az értekezés eredményeit foglalja össze és néhány általános megjegyzést tartalmaz. A kutatási eredmények részletes kifejtése a 2–6. fejezetekben történik. A 8. fejezet Jelöltnek az értekezéshez kapcsolódó publikációit sorolja fel, a 9. fejezet pedig a felhasznált szakirodalmi források listáját tartalmazza. Az eredmények részletes kifejtését tartalmazó fejezetek magukba foglalják az adott fejezetekre vonatkozó jelölések jegyzékét is, ami hozzájárul az adott anyagrész könnyebb olvasásához. A következőkben áttekintem az értekezés öt (2–6.) érdemi fejezetét, amelyek a tudományos eredmények részletes bemutatását tartalmazzák, bemutatva az egyes fejezetek kutatási területeit és az elért főbb eredményeket.

Az értekezés **2. fejezete** a lineáris termelésstervezési modellek érzékenységvizsgálatával foglalkozik, kapcsolódva a lineáris programozás (LP) egyik klasszikus feladatához. Az alapvető matematikai formalizmus és meghatározások bevezetése után Jelölt azzal foglalkozik, hogy degenerált esetben (a meghatározással kapcsolatban ld. 8. o.) hogyan értelmezhető az érzékenységi információ és a degeneráció következtében kapott eredmény és mit jelent a döntéshozó számára. A degenerációval kapcsolatos problémák kiküszöbölésére Jelölt megoldást is ajánl, amelynek alapja az érzékenységi információk csoportosítása az információ felhasználásának jellege szerint. A degeneráció részletes matematikai tárgyalása – többek között a Jelölt által is megadott hivatkozásokban – ismert, azonban a degeneráció hatásának vizsgálata az érzékenységvizsgálati eredményeket felhasználó menedzsment-döntésekre, továbbá az értekezésben konkrétan a termelésstervezési döntésekre, az operációkutatók részére is új kérdéseket vet fel. A bázis állandóságát vizsgáló (és matematikai szempontból érdekes) érzékenységvizsgálat állt ugyanis eddig a témakört tárgyaló szakirodalom középpontjában és a klasszikus I. típus (8. o.) érzékenységvizsgálatáról a legtöbb LP megoldó gondoskodik. A Jelölt által definiált új érzékenységvizsgálati kategóriák, nevezetesen a támasztóhalmaz állandóságát (II. típus, 8. o.), valamint a célfüggvény-érték függvény meredekségének állandóságát (III. típus, 9. o.) vizsgáló érzékenységvizsgálat a lineáris programozás és az azt felhasználó terület számára egyaránt fontos kérdés és az ehhez kapcsolódó megállapítások értékes kutatási eredmények. Ezt támasztja alá az a sok szakirodalmi hivatkozás, amelyet Jelölt az érzékenységvizsgálati típusokat definiáló cikkére - többek között operációkutatási területről is - kapott. Az érzékenységvizsgálati kategóriák definiálásán túl Jelölt egy könnyen implementálható algoritmust is közölt a III. típusú érzékenységvizsgálat végrehajtására. A fejezetben bemutatott egyszerű, sokszor grafikusán ábrázolható problémák, látványosan szemléltetik a javasolt három érzékenységvizsgálati kategória elkülönítésének szükségességét.

Az értekezés **3. fejezetének** tárgya a rugalmas gyártórendszerek kapacitásának meghatározásakor felmerülő nehézségek vizsgálata. Ezekben a gyártórendszerekben az alkatrészek sokféle útvonalon (eltérő gépeket érintve) haladhatnak. Az egyes gépek által végrehajtható műveletek ugyanakkor részben lehetnek egyediek, de vannak olyan műveletek is, amelyeket több berendezés is el tud végezni. A kapacitás ebben az esetben rendszerint függ a választott útvonaltól, ezért ha az útvonal meghatározása még nem történt meg, akkor a kapacitás meghatározása elvileg nem lehetséges. Ezt a problémát Jelölt a művelettípus fogalmának definiálásával és a gépkapacitás helyett a művelettípus-halmaz kapacitáskorlát meghatározásával oldja meg. A művelet-típus halmaz kapacitáskorlát szempontjából megengedett megoldások halmazának változását Jelölt két paraméter változásának függvényében vizsgálta. Meghatározta, hogy a gépek rendelkezésre álló idejének, valamint az alkatrészek fajlagos kapacitásigényének változása hogyan hat a megengedett megoldások halmazára.

A rugalmas rendszerek kapacitáskorlátjának Jelölt által javasolt közelítését új tudományos eredménynek tartom, amely a kapacitásvizsgálatok elvégzését lehetővé teszi már akkor, amikor még a tényleges gyártási útvonalak nem ismertek. A művelettípus-halmaz grafikus megjelenítésére készített 3.4. ábra szemléletesen mutatja be a megengedett megoldások tartományát és annak lehetséges változását.

Az értekezés **4. fejezete** a gyártósor-kiegyenlítési modellekhez kapcsolódóan a munkaerő képzettségét figyelembe vevő érzékenységvizsgálati kérdéseket tárgyalja, továbbá a gyártási mennyiségnek az optimális megoldásra kifejtett hatását vizsgálja. Jelölt a képzettségi korlátok három típusát különíti el aszerint, hogy az alacsony képzettségű munkások minimális száma, a magas képzettségű munkások maximális száma, vagy az egymással nem keveredhető, speciális képzettséget igénylő tevékenységek halmazai adottak-e. A képzettségi korlátok matematikai leírása korrekt, az illusztrációhoz használt példa szemléletesen mutatja az egyes képzettségi kategóriák eltérő jellegét és azok hatását az optimális megoldásra.

Az ALB modellben az l_{jk} , h_{jk} és e_{jk} képzettségi változók (ld. 4.2. táblázat) számának korlátozása érdekében a j indexre bevezetett (4.23) szerinti alsó korlát (LS_k) és a (4.24) szerinti felső korlát (US_k) ügyes kiterjesztése az alapfeladat x_{ij} változóinak számát korlátozó LT_i és UT_i korlátoknak. Jelölt azon állítása, hogy a képzettségi változók bevezetése nem növeli jelentősen a változók számát, e korlátok alkalmazásával elfogadható.

A továbbiakban Jelölt a gyártási mennyiség és a hatékonyság kapcsolatát vizsgálja és a (4.28) összefüggés segítségével megmutatja, hogy egy adott gyártósor-konfiguráció esetén ez a kapcsolat lineáris függvénnyel írható le. A (4.28) összefüggés szerinti $E(Q,N)$ egy kétváltozós függvény, de az N változó értelmezési tartománya csak a szóba jöhető pozitív egész számokat tartalmazza. Egy adott N esetén pedig az $E(Q,N)$ függvény a Q változóban valóban lineáris.

E fejezet tartalmazza még egy kerékpár összeszerelő üzem gyártási folyamatának gyártósor-kiegyenlítési modelljét. Jelölt egy viszonylag kisméretű, de valós folyamat segítségével látványosan illusztrálja a definiált képzettségi korlátok hatását a gyártási mennyiségre. Ugyancsak szemléletes a gyártósor hatékonyságát leíró függvény gyakorlati alkalmazási lehetőségének bemutatása.

Az értekezés **5. fejezete** egy termelésütemezési eredmény változását vizsgálja az egyik művelet idejének változásakor. A fejezet eleje tartalmazza a perturbáció analízis (PA) koncepcióját a matematikai formalizmussal együtt. Az ismertett, perturbáció elemzésen alapuló érzékenységvizsgálat elvégezhető bármilyen ütemezési algoritmus alkalmazásával kapott eredményre. Jelölt az alapösszefüggések összefoglalása után diszkrét szimulációs környezetben mutatja be az érzékenységvizsgálati eredmények számítását. Ezt követően egy acélipari folyamat vizsgálatával illusztrálja a kidolgozott módszer gyakorlati jelentőségét.

Az átfutási idő gradiensek meghatározásához használt eseménysorrend táblázat (event sequence table) képezi a számítások alapját. E táblázat szerkezete határozza meg, hogy mely szakaszban lineáris az átfutási idő változása egy műveleti idő változásának függvényében. Lényegében tehát egy szakaszonként lineáris függvény egyes szakaszainak gradiensét és a gradiens érvényességi tartományát kell meghatározni. A gradiens számítása a szakirodalomban részletesen tárgyal (lásd például Ho, Y.C. and Cao, X.R., 1991. *Perturbation analysis of discrete event dynamic systems*. Kluwer Academic Publisher). Az érvényességi tartomány meghatározása azonban Jelölt saját tudományos eredménye.

Az értekezés **6. fejezete** a termelésütemezés egy speciális problémáját vizsgálja. Jelölt meghatározza a készlettartási költséget minimalizáló ütemezést arra az esetre, amikor egyetlen gép hajtja végre a műveleteket úgy, hogy az alapanyagok a művelet végrehajtásának kezdetekor érkeznek, de valamennyi termék kiszállítása egyetlen előre meghatározott időpontban történik. A termékek folyamideje tehát a művelet elkezdésétől az előre rögzített határidőig tart. Ezen alapprobléma négy variációját vizsgálja meg Jelölt. Kétféle készlettartási-költség számítási módot alkalmaz arra az esetre, amikor valamennyi termék határideje közös, valamint amikor a termékek szállítási határideje eltérő. A felcserélési algoritmussal levezetett négy ütemezési szabály a definiált négy eset mindegyikére optimális megoldást eredményez, amelyet Jelölt bebizonyított. A levezetett ütemezési szabályok egy már ismert eljárásra, a szomszédos feladatok felcserélésére (adjacent pair interchange) épülnek. Ezen ismert eljárás alkalmazása Jelölt által definiált és gyakorlati jelentőséggel bíró feladatokra új, optimális ütemezést adó ütemezési szabályokhoz vezetett.

Jelen fejezet elméleti szempontból legfontosabb tudományos eredménye a kapott optimális megoldás robusztusságának elemzése a készlettartási költség számítási módja szempontjából. Jelölt meghatározza a készlettartási költség legkedvezőbb, majd legkedvezőtlenebb számítási módja esetén az optimális ütemezést. Ezt követően bebizonyítja (és ezt tézisként is megfogalmazza), hogy a gyakorlatban csak nagyon ritkán előforduló két szélsőséges esetben kapunk eltérő optimális gyártási sorrendet. Az eltérések feltételeit Jelölt egzakt módon meghatározza és a formális matematikai bizonyítás mellett egy gyakorlati (nyomdaipari) probléma segítségével is illusztrálja a kapott eredményt. A levont általános következtetés, miszerint a készlettartási költség számítási módja nem befolyásolja az optimális ütemezést, a pénzügyi és műszaki döntések e körben tapasztalható függetlenségét fogalmazza meg.

3. KRITIKAI ÉSZREVÉTELEK

Az értekezés érdemi tudományos eredményeit nem befolyásoló kritikai észrevételem és kérdésem a következő:

1. A 3. fejezetben a művelettípus halmazok lehetséges maximális számát Jelölt az alábbi (3.7) összefüggés segítségével határozza meg:

$$K = 2^{(2^M - 1)} - 1$$

Az összefüggés egyben a matematikai programozási feladatban alkalmazott korlátok legalább felét jelenti, mert alsó és felső korlátot definiál valamennyi művelettípus halmazra. Ez a képlet már viszonylag kis M esetén is igen nagy számot eredményez. Kérdés, hogy ilyen nagyszámú korlátozó feltétel esetén található-e megengedett megoldás.

2. A 4. fejezetben a „Kizárólagosképzettség-korlátok” (ESC) modellezésekor Jelölt nem tárgyalja azt az esetet, amikor a tevékenységek egy részhalmazát több speciális munkás is el tudja végezni. Ha tehát a kizárólagosság nem a munkás képzettségének megfelelő valamennyi tevékenységre vonatkozik, akkor hogyan módosul a matematikai modell?

4. A TÉZISEK ÉRTÉKELÉSE

Jelölt 5 téziscsoportot határozott meg. Az egyes téziscsoportok az értekezés 5 főfejezetének eredményeit foglalják össze. A Tézisfüzetben megfogalmazott eredmények összhangban vannak a disszertációban kifejtettekkel, a téziseket összességükben és külön-külön is elfogadom az alábbiak szerint:

Az **első téziscsoport** (a tézisfüzet 3.1. pontja) a lineáris programozási modellek érzékenységvizsgálatával kapcsolatos eredményeket tartalmazza. Elfogadom tudományos eredményként:

- a) az érzékenységvizsgálati típusok osztályozását (1/1. tézis), amelynek tudományos jelentőségét Jelölt által kapott nagyszámú hivatkozás is alátámasztja.
- b) a III. Típusú érzékenységvizsgálat számításához szükséges összefüggések egységes rendszerbe foglalását (1/2. tézis). Az újdonság itt véleményem szerint nem maga az algoritmus, hanem a számítás során megoldandó modellek rendszerezett összefoglalása.

A **második téziscsoport** (a tézisfüzet 3.2. pontja) a rugalmas gyártórendszerek kapacitásmodellezésével foglalkozik. Elfogadom tudományos eredményként:

- a) a rugalmas gyártórendszerek kapacitásának a művelettípus-halmaz kapacitás korlát segítségével történő modellezését (2/1. tézis).
- b) a művelettípus-halmaz kapacitáskorlátok esetén a megengedett megoldás gépkapacitás és fajlagos kapacitásigény szerinti érzékenységvizsgálatára levezetett összefüggéseket (2/2. és 2/3. tézisek).

A **harmadik téziscsoport** (a tézisfüzet 3.3. pontja) az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modellekkel kapcsolatos eredményeket foglalja össze. Elfogadom tudományos eredményként:

- a) a képzettségi korlát típusok csoportosítására tett javaslatot és az egyes csoportok modellezését leíró összefüggéseket (3/1. tézist).
- b) a gyártási mennyiség azon intervallumának meghatározását (3/2. tézis), amelyen belüli értékek mindegyikére optimális az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modell eredménye.

A **negyedik tézis** (a tézisfüzet 3.4. pontja) az átfutási idő perturbáció elemzéssel meghatározott érzékenységgel foglalkozik. Elfogadom tudományos eredményként:

- a) az átfutási idő egy meghatározott tevékenység ideje szerinti gradiensének érvényességi tartományát meghatározó összefüggéseket (4. tézis).

Az **ötödik téziscsoport** (a tézisfüzet 3.5. pontja) a készlettartási-költséget minimalizáló egy-erőforrásos ütemezési problémával kapcsolatos eredményeket tartalmazza. Elfogadom tudományos eredményként:

- a) az egy-erőforrásos ütemezési feladatnál, a termékek *azonos* szállítási határidejét feltételezve, a periodikus és a folyamatos kamatszámítás eseteire érvényes ütemezési szabályokat (5/1. tézis).

- b) az egy-erőforrásos ütemezési feladatnál, a termékek *eltérő* szállítási határidejét feltételezve, a periodikus és a folyamatos kamatszámítás eseteire érvényes ütemezési szabályokat (5/2. tétel).
- c) azt az értekezésben részletesen bizonyított megállapítást, hogy a készlettartási költség számításának módja gyakorlatilag nem befolyásolja az optimális ütemezést a jelzett problémák esetén (5/3. tétel).

5. ÖSSZEFOGLALÓ VÉLEMÉNY

Az értekezés egységes rendszerben, megfelelő formában és jól követhetően mutatja be Jelöltnek a PhD fokozat megszerzése óta elért azon tudományos eredményeit, amelyek a termelésstervezés és termelésütemezés egyes kérdéseinek érzékenységvizsgálatára vonatkoznak. Az értekezésben tárgyalt kutatási problémák elméleti és gyakorlati szempontból is fontosak, és az alkalmazott operációkutatás területén is lényeges tudományos kérdéseket érintenek. Az értekezés logikusan szerkesztett, a saját tudományos eredmények könnyen elkülöníthetők és a disszertációban tárgyalt gyakorlati feladatok jelentős mértékben hozzájárulnak az elért eredmények megértéséhez. A tézisekben megfogalmazott tudományos eredmények rangos nemzetközi lapokban kerültek publikálásra és elfogadhatók új tudományos eredményekként.

Összefoglalóan megállapítható, hogy Koltai Tamás értekezése mind formai, mind tartalmi vonatkozásban kielégíti az MTA doktori szabályzatában előírt követelményeket. Jelölt a kandidátusi fokozat megszerzése óta jelentős saját tudományos eredményekkel gyarapította a termelésstervezés és termelésütemezés (industrial engineering) tudományterületét. Mindezek alapján a disszertációt nyilvános vitára alkalmasnak tartom és javaslom a nyilvános vita kitűzését, valamint Koltai Tamás részére az MTA doktora cím odaítélését.

Budapest, 2015. augusztus 30.

Dr.Szeidl László

a mat. tud.(MTA) doktora